

第1章 电力电子器件

- ◆ 电力电子技术和电子学的关系
- ◆ 电力电子器件概述
- ◆ 功率二极管
- ◆ 晶闸管
- ◆ 电力晶体管（GTR）
- ◆ 功率场效应晶体管（功率MOSFET）
- ◆ 绝缘栅双极型复合晶体管（IGBT）

1.1 电力电子技术和电子学的关系

- **电力电子电路和电子电路**
 - 许多分析方法一致，仅应用目的不同。
 - 广义而言，电子电路中的功放和功率输出也可算做电力电子电路。
 - 电力电子电路广泛用于电视机、计算机等电子装置中，其电源部分都是电力电子电路。
- **器件的工作状态**
 - 信息电子：半导体器件既可处于放大状态，也可处于开关状态；
 - 电力电子：为避免功率损耗过大，电力电子器件总是工作在开关状态，这是电力电子技术的一个重要特征。

1.2 电力电子器件概述

- 电力电子器件的概念
- 电力电子器件的特征
- 应用电力电子器件的系统组成
- 电力电子器件的分类

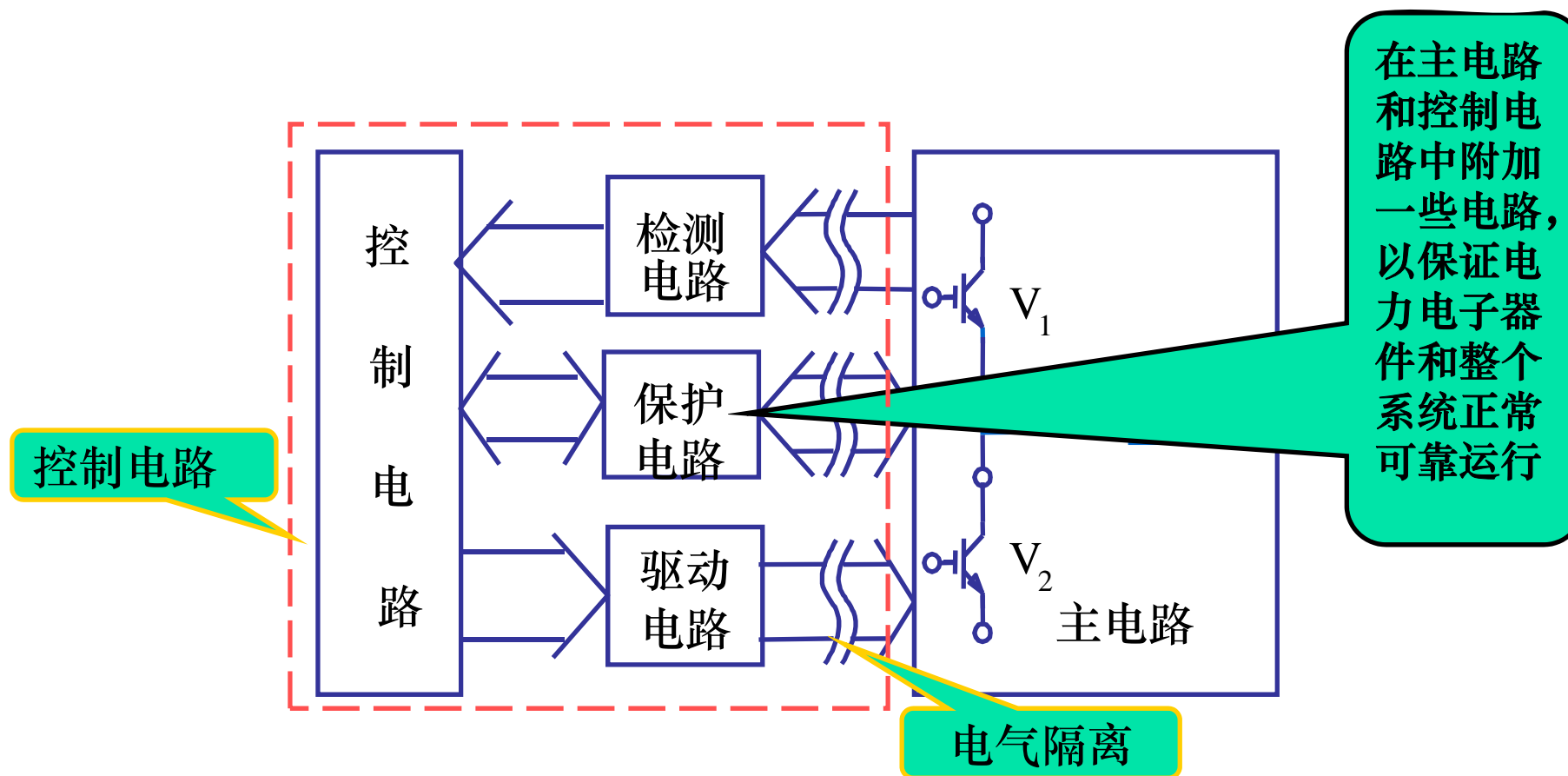
1.2.1 电力电子器件的概念

- **电力电子器件：可直接用于主电路中，实现电能的变换或控制的电子器件。P2**
 - **SCR: 晶闸管**
 - **GTO: 可关断晶闸管**
 - **GTR: 大功率晶体管**
 - **MOSFET: 功率场效应管**
 - **IGBT: 绝缘栅门控双极型晶体管**
- **主电路: 电气设备或电力系统中，直接承担电能的变换或控制任务的电路。**

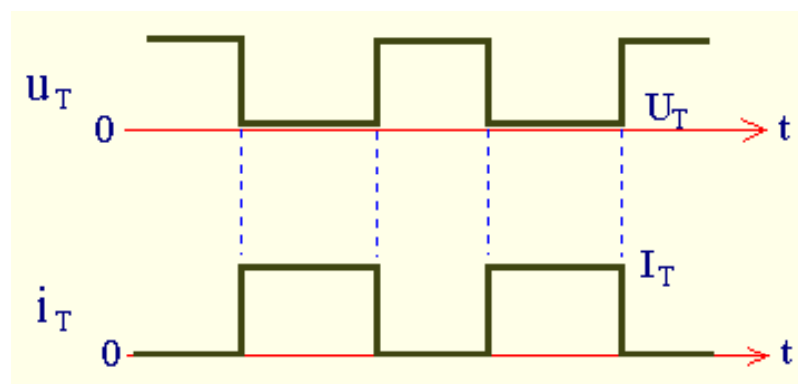
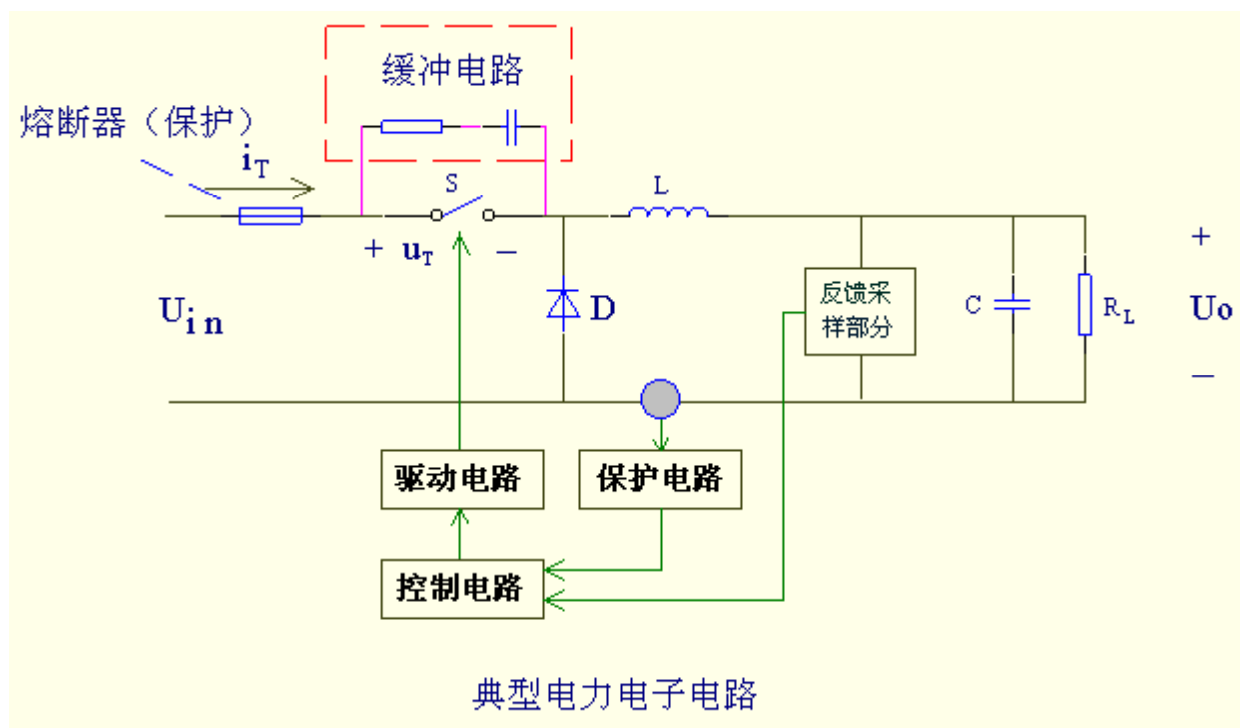
1.2.2 电力电子器件的特征

- 同处理信息的电子器件相比的一般特征：
 - 能处理电功率的能力，一般远大于处理信息的电子器件。
 - 电力电子器件一般都工作在**开关状态**。
 - 电力电子器件往往需要由**信息电子电路**来控制。
 - 电力电子器件自身的功率损耗远大于信息电子器件，一般都要安装**散热器**。
 - 电力电子器件的主要用途是高速开关，导通时有明显的管压降，关断时有漏电流。过载能力不强，**器件使用的电压和电流须严格限制在给定的范围内**。

1.2.3 应用电力电子器件系统组成




电力电子系统：由**控制电路**、**驱动电路**、**保护电路**和以电力电子器件为核心的**主电路**组成。



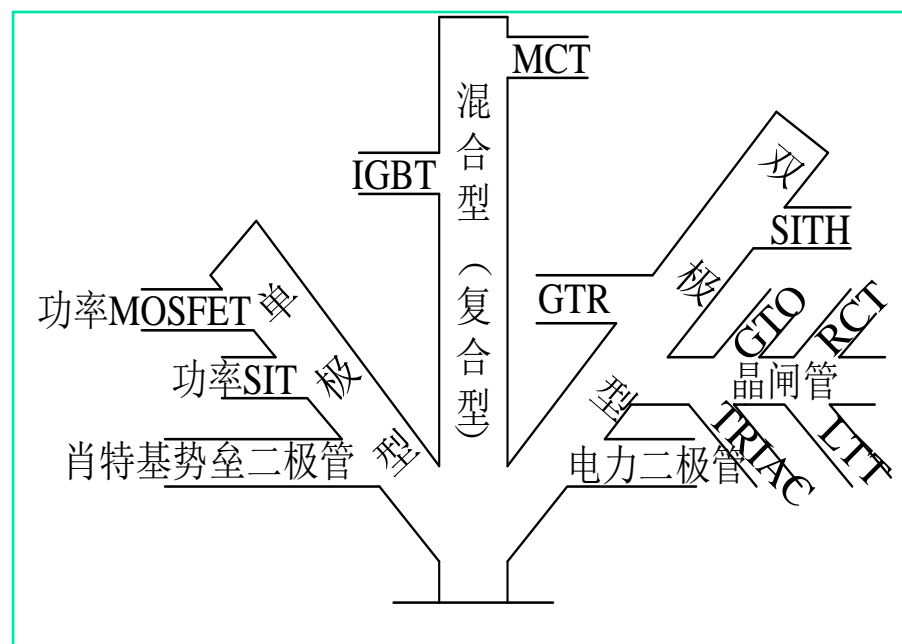
1.2.4 电力电子器件的分类

- **按照控制特性，分为以下三类：**
 - **不控型器件(Power Diode)**
 - 不能用控制信号来控制其通断, 因此也就不需要驱动电路。
 - **半控型器件 (SCR)**
 - 通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断。
 - **全控型器件 (IGBT , MOSFET , GTR , GTO等)**
 - 通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断，又称自关断器件。

- 
-
- 按照驱动电路信号的性质，分为两类：
 - **电流型**控制器件（**SCR**，**GTR**，**GTO**等）
 - 通过从控制端注入或者抽出**电流**来实现导通或者关断的控制。
 - **电压型**控制器件
 - 仅通过在控制端和公共端之间施加一定的**电压**信号就可实现导通或者关断的控制。
 - 电压驱动型器件实际上是通过加在控制端上的电压在器件的两个主电路端子之间产生可控的电场来改变流过器件的电流大小和通断状态，所以又称为**场控器件**(Field Controlled Device)，或**场效应器件**。

按照载流子工作性质分为三类：

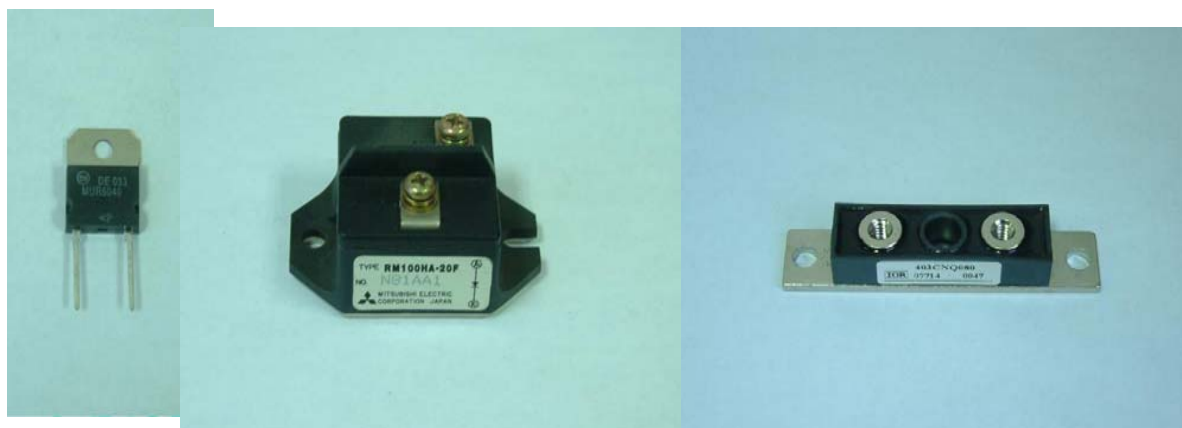
- 单极型器件(Unipolar Device)
 - 由一种载流子参与导电的器件
- 双极型器件(Bipolar Device)
 - 由电子和空穴两种载流子参与导电的器件
- 复合型器件(Complex Device)
 - 由单极型器件和双极型器件集成混合而成的器件



电力电子器件分类树

1.3 功率二极管

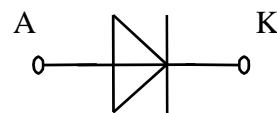
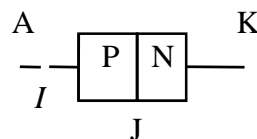
- **功率二极管**（Power Diode）结构和原理简单，工作可靠，自20世纪50年代初期就获得应用。
- 根据器件的基本结构分类，可分为**PN结功率二极管**和**肖特基功率二极管**，分别在中、高频整流和逆变，以及低压高频整流的场合，具有不可替代的地位。



整流二极管及模块

1.3.1 PN结功率二极管

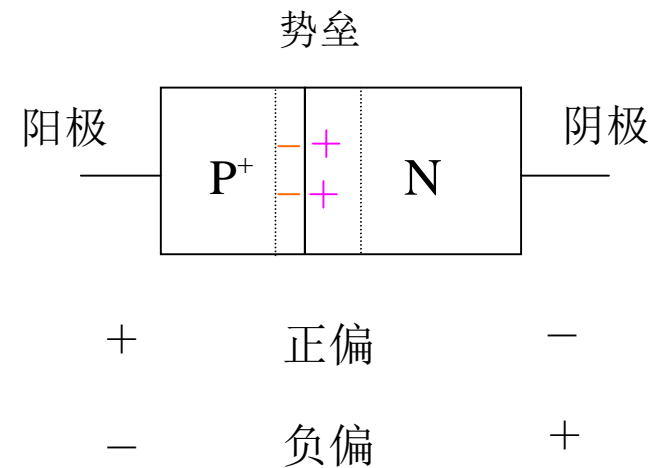
- 基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管一样。
- 由一个面积较大的PN结和两端引线以及封装组成的。



功率二极管结构和电气图形符号

PN结的状态

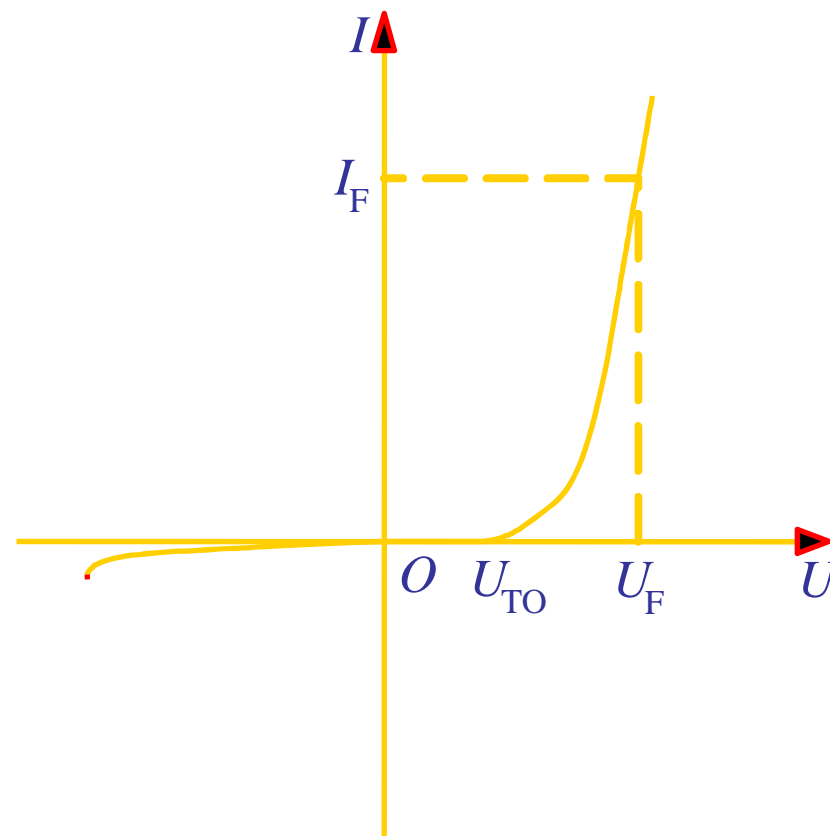
状态参数	正向导通	反向截止	反向击穿
电流	正向大	几乎为零	反向大
电压	维持1V	反向大	反向大
阻态	低阻态	高阻态	——



二极管的基本原理就在于PN结的单向导电性这一主要特征。

1、静态特性

- 主要指其伏安特性
- 具有单向导电性
- **正偏**时：降低势垒，二极管导通，通态压降1伏左右。
- **反偏**时：
 - 在达到击穿电压前，仅有很小的反向漏电流流过。
 - 在达到击穿电压后，反向电流急剧增加。



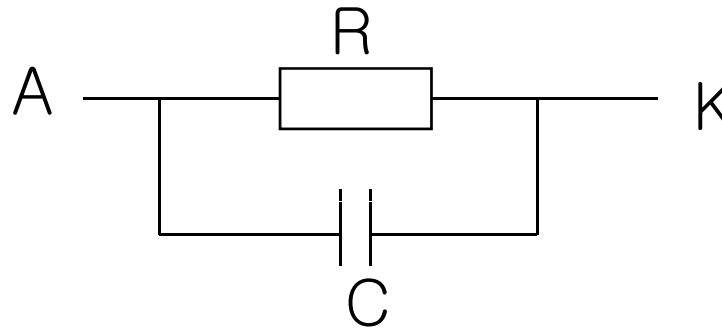
电力二极管的伏安特性

2、动态特性

- 动态特性主要指**开关特性**，开关特性反映**通态**和**断态**之间的转换过程。
- 动态特性：因**结电容**的存在，**正向**、**反向**、**零偏置**三种状态之间的转换必然有一个**过渡过程**，此过程中的电压—电流特性是随时间变化的。

PN结的电容效应：

- PN结的电荷量随外加电压而变化，呈现**电容效应**。
- 由于存在**结电容C**，二极管从通态转到阻断状态时，**需要一定的反向恢复时间**，才能释放完所存储的电荷，恢复其反向阻断电压的能力，而处于完全截止状态。二极管在未恢复阻断能力之前，相当于短路状态。
- **电容影响PN结的工作频率，尤其是高速的开关状态。**因此在设计高频开关电路时应该充分考虑。



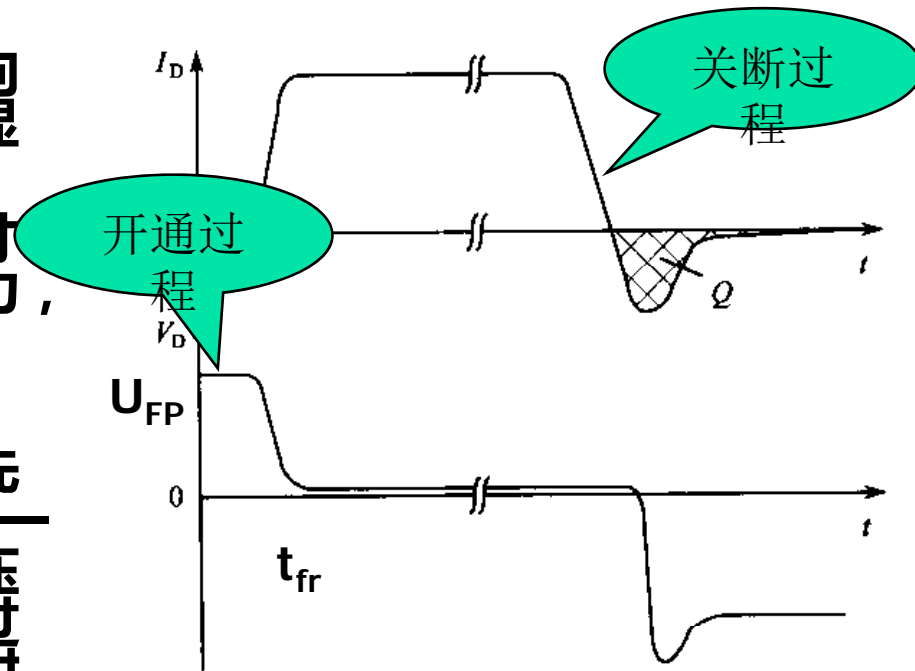
PN结高频等效电路

■ 关断过程

- 在关断之前有较大的反向电流出现，并伴随有明显的反向电压过冲。
- 须经过一段短暂的时间才能重新获得反向阻断能力，进入截止状态

■ 开通过程

- 电力二极管的正向压降先出现一个过冲 U_{FP} ，经过一段时间才趋于接近稳态压降的某个值。这一动态过程时间被称为正向恢复时间 t_{fr} 。
- 正向电流的上升会因器件自身的电感而产生较大压降。电流上升率越大， U_{FP} 越高



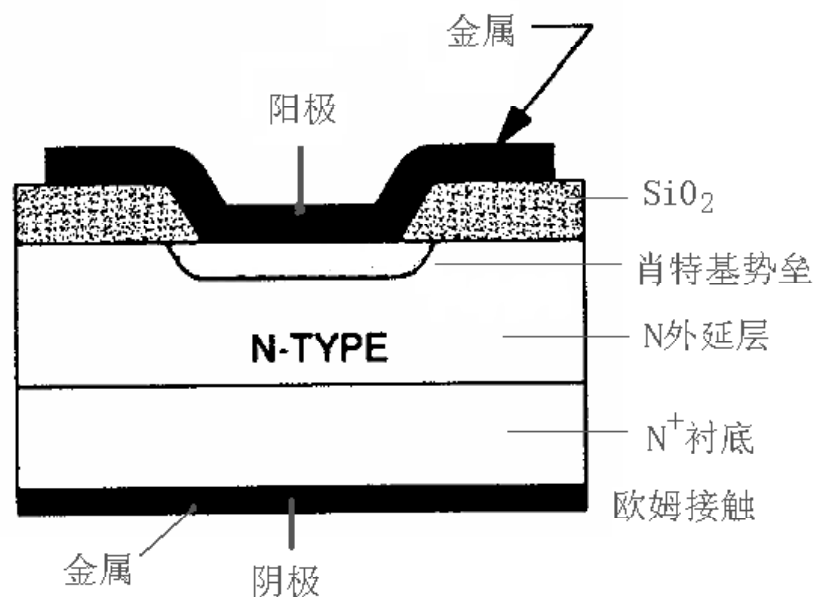
二极管开关过程工作波形

3 应用

- **使交流功率整流为直流功率**
 - 又称整流二极管 (Rectifier Diode)
 - 多用于开关频率不高 (1kHz以下) 的整流电路
 - 其反向恢复时间较长
 - 正向电流定额和反向电压定额可以达到很高
- **回馈**
- **续流**

1.3.2 肖特基功率二极管

- 以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管称为肖特基势垒二极管（Schottky Barrier Diode ——SBD）。



■ 肖特基二极管的优点

- 反向恢复时间很短 (10~40ns)。
- 正向恢复过程中也不会有明显的电压过冲。
- 反向耐压较低时其正向压降明显低于快恢复二极管。
- 效率高，其开关损耗和正向导通损耗都比快速二极管还小。

■ 肖特基二极管的弱点

- 反向耐压提高时正向压降会提高，多用于200V以下。
- 反向稳态损耗不能忽略，必须严格地限制其工作温度。

■ 应用

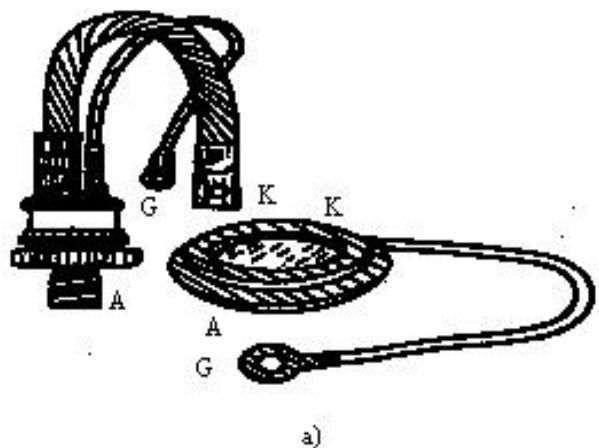
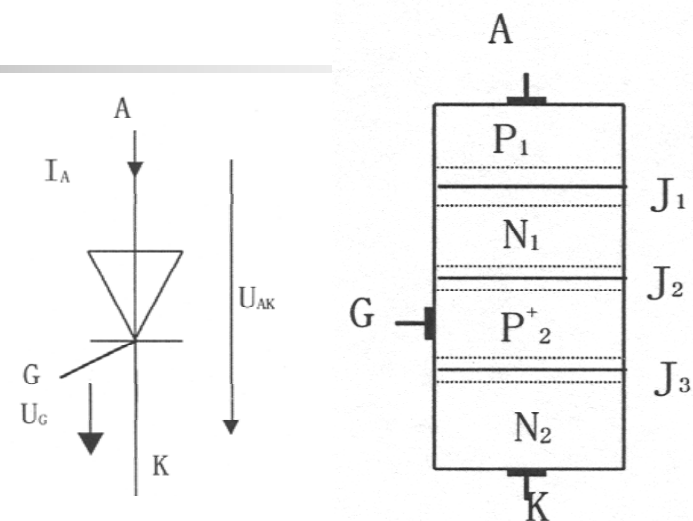
- 适合于高频低压应用

1.4 晶闸管

- **晶闸管（Thyristor）：**晶体闸流管，是具有PNPN四层结构的各种开关器件的总称。
 - 1956年美国贝尔实验室发明了晶闸管。
 - 1957年美国通用电气公司开发出第一只晶闸管产品。
 - 1958年商业化。
 - 开辟了电力电子技术迅速发展和广泛应用的崭新时代。
 - 20世纪80年代以来，开始被全控型器件取代。
 - 能承受的电压和电流容量最高，工作可靠，在大容量的场合具有重要地位。
- **普通晶闸管：**也称**可控硅整流管**（Silicon Controlled Rectifier——SCR）
- **派生器件：**快速晶闸管、逆导晶闸管、门极可关断晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管等。

1.4.1 普通晶闸管

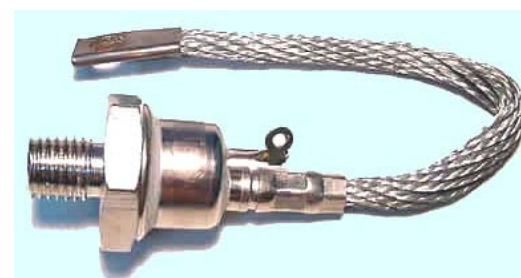
- 晶闸管具有三个联接端的PNPN结构
- 外形有**螺栓型**和**平板型**两种封装。
 - 螺栓型封装，通常螺栓是其阳极，能与散热器紧密联接且安装方便。
 - 平板型晶闸管可由两个散热器将其夹在中间。



平板型晶闸管



晶闸管模块



螺栓型晶闸管

晶闸管的外形、结构和电气图形符号

2018/9/3

电力电子技术

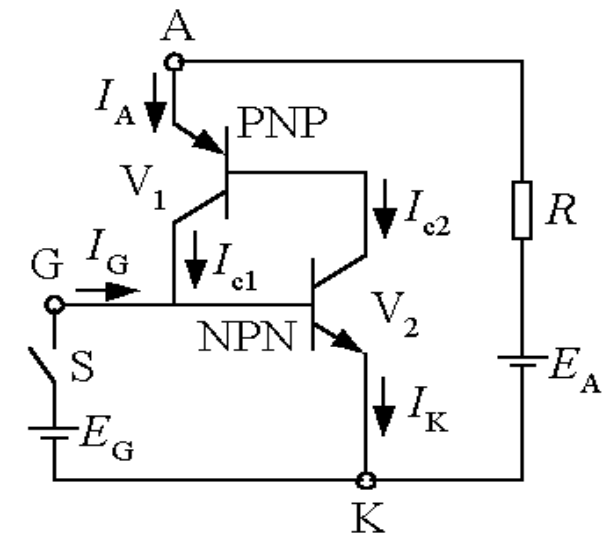
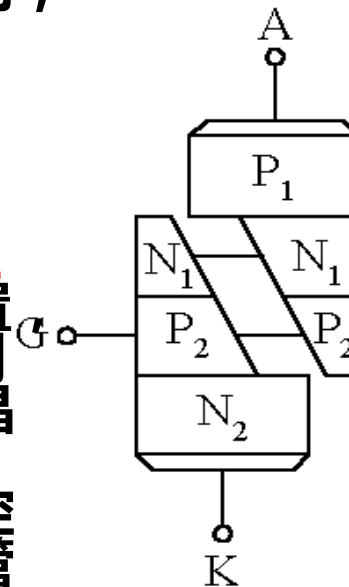
1、工作原理

- 晶闸管阳极A和阴极K之间加正向电压，控制极不加电压时，由于PN结 J_2 处于反向偏置，晶闸管不导通，称为阻断；当阳极和阴极之间加反向电压时，由于PN结 J_1 、 J_3 处于反向偏置，无论控制极是否加电压，晶闸管都不导通。
- 当晶闸管阳极A和阴极K之间加正向电压，控制极G也加正向电压时，则 J_3 处于正向偏置，有控制极电流 I_G ，当 I_G 达到一定数值时，晶闸管导通。晶闸管导通后，即使 I_G 消失，晶闸管仍能继续导通，失去控制作用；晶闸管导通后，其管压降很小，约1V左右，通过的电流决定于外电路。

注入 I_G 时

$$I_{b2} \uparrow \rightarrow I_{c2} \uparrow = I_{b1} \uparrow \rightarrow I_{c1} \uparrow$$

↑ ----- ↓



a) 双晶体管模型

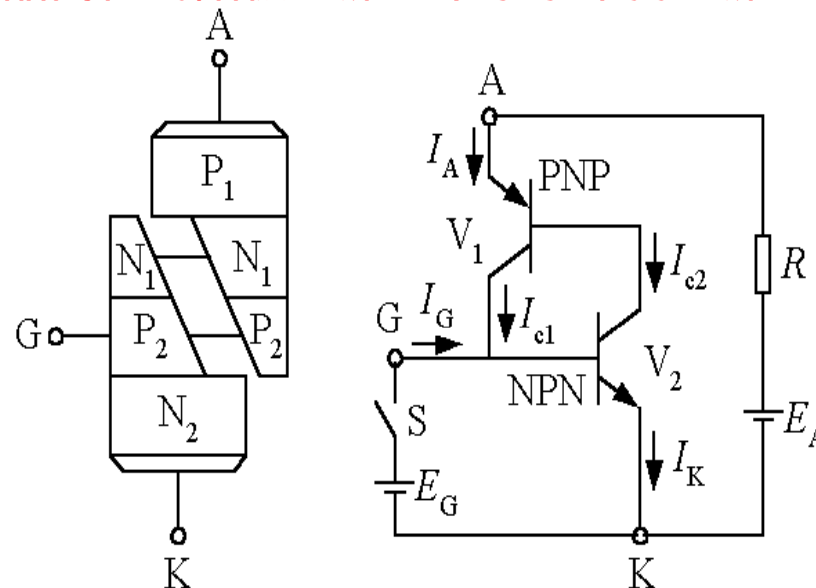
b) 工作原理

晶闸管的双晶体管模型及其工作原理

- 晶闸管导通必须具备的条件为：
除阳极与阴极间加正向电压外，还要在控制极与阴极间加适当正向电压，同时还要求晶闸管的阳极电流不小于维持电流 I_H 。满足这三个条件，晶闸管才能导通，否则就处于阻断状态。
- 晶闸管导通后，控制极即失去控制作用，即使去掉门极电流或加负的门极电流也不能使其关断。要使其阻断，必须把阳极与阴极间的正向电压降低到一定值，或断开、或反向，或使阳极电流小于维持电流。

开通条件：

1. 阳极和阴极间加正向电压 U_{AK}
2. 控制极G加适当正向电压
3. 晶闸管的阳极电流 I_A 不小于维持电流 I_H

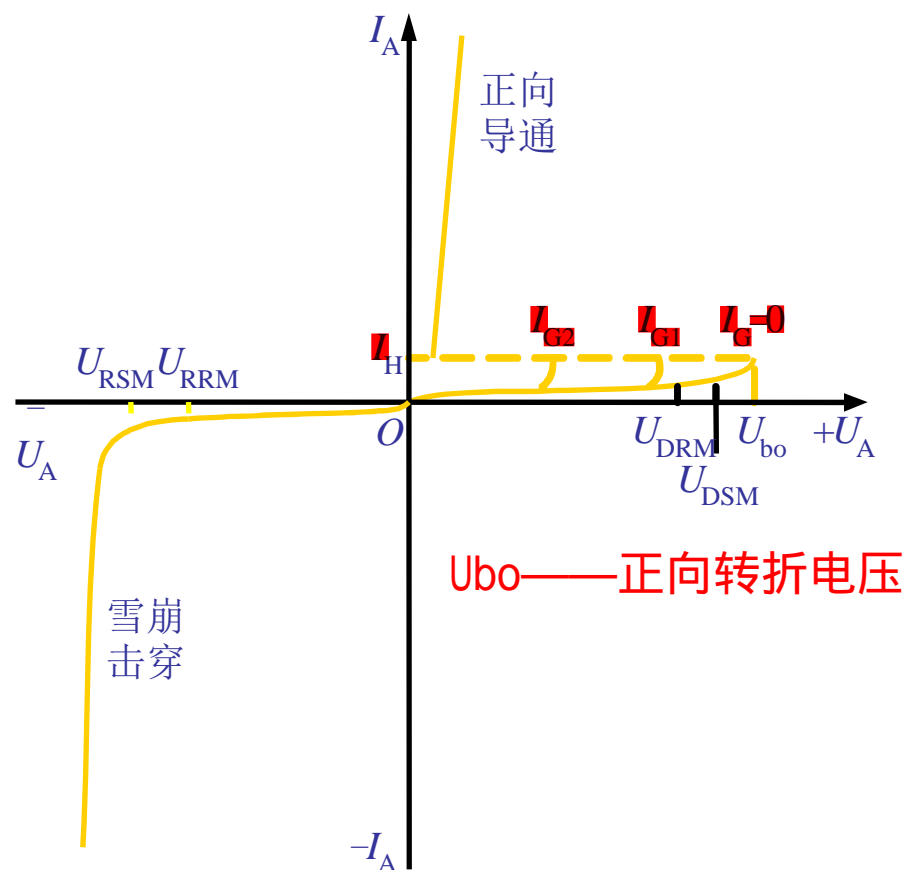


阻断条件：阳阴极电压 U_{AK} 降低到一定值，或反向，或断开
或 使阳极电流 I_A 小于维持电流 I_H

2 晶闸管的静态特性

(1) 正向特性

- $I_G=0$ 时，器件两端施加正向电压，只有很小的正向漏电流，为正向阻断状态。
- 正向电压超过正向转折电压 U_{bo} ，则漏电流急剧增大，器件开通。
- 随着门极电流幅值的增大，正向转折电压降低。
- 晶闸管本身的压降很小，在1V左右。

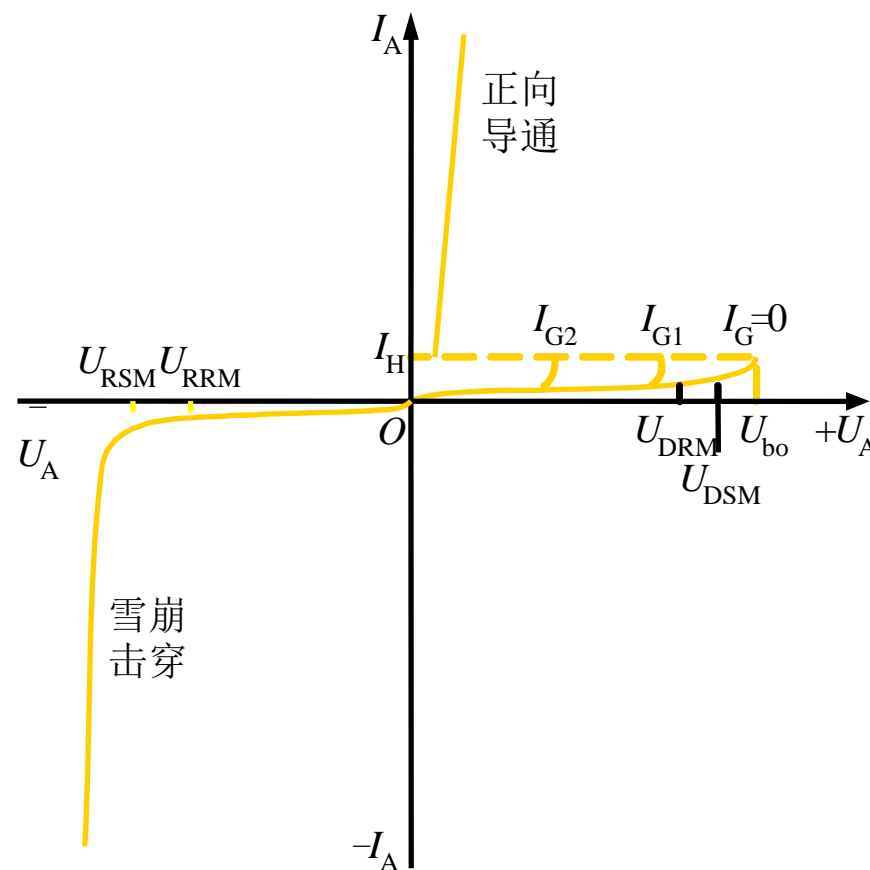


晶闸管的伏安特性

$$I_{G2} > I_{G1} > I_G$$

(2) 反向特性

- 反向特性类似二极管的反向特性。
- 反向阻断状态时，只有极小的反相漏电流流过。
- 当反向电压达到反向击穿电压后，可能导致晶闸管发热损坏。



晶闸管的伏安特性
 $I_{G2} > I_{G1} > I_G$

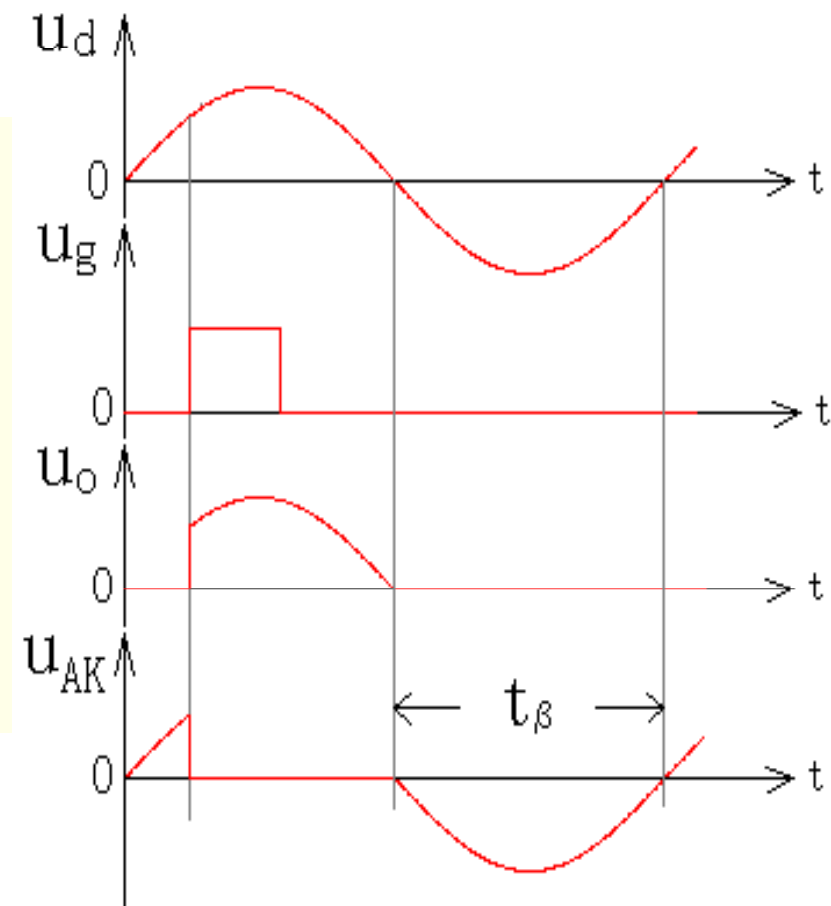
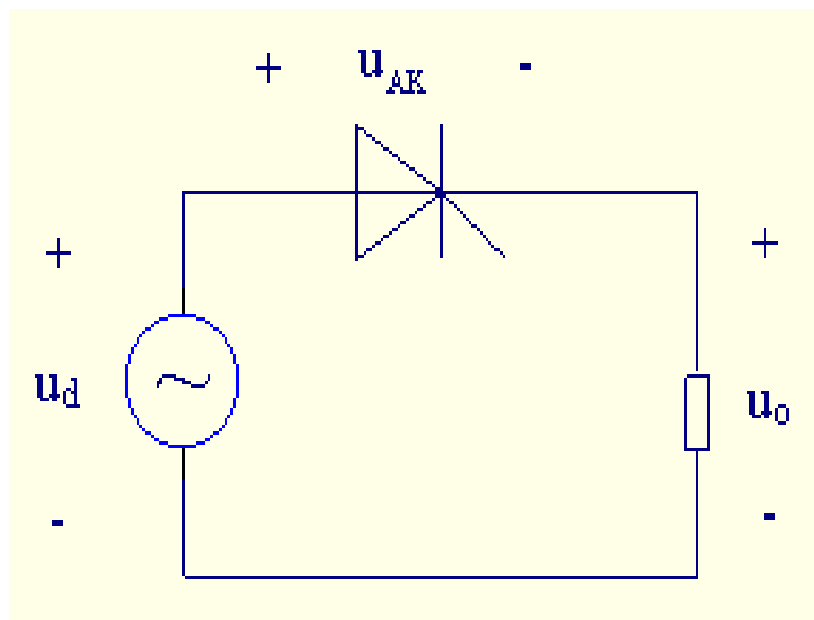
3. 触发导通

- 如果晶闸管阳极电压 U_{AK} 为正值，且注入足够的门极电流，从而使器件进入饱和导通，称为晶闸管的触发导通。
- **触发导通条件**： $U_{AK} > 0$ ， $U_{GK} > 0$ ，并有足够的触发功率。
 - 一旦器件导通，门极电流就不再具有控制作用。因此，门极触发电流可用**脉冲**电流，无需用直流。

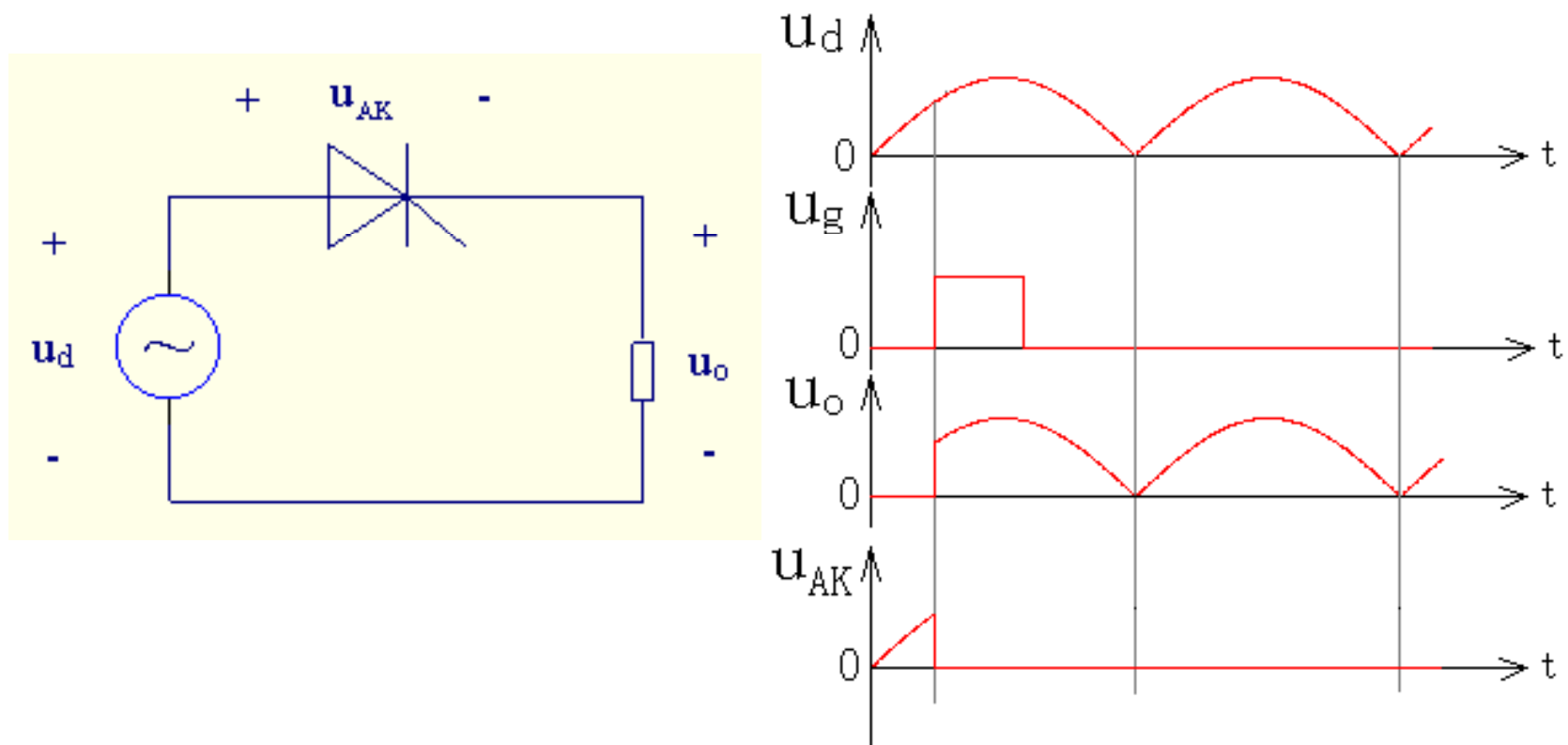
4. 关断

- **自然关断**：在导通期间，如果要求器件返回到正向阻断状态，必须令门极电流为零，且将阳极电流降低到一个称为维持电流的临界极限值以下，并保持一段时间。
- **强迫关断**：通过加一反向电压 $U_{AK} < 0$ ，并保持一段时间使其关断。
- **因此关断条件**： $U_{AK} < 0$ （或 $I_A < I_H$ ），并保持一段时间。在实际电路中是采用阳极电压反向、减小阳极电压、增大回路阻抗等方式，使阳极电流小于维持电流，使晶闸管关断。
 - **维持电流 I_H** ：使晶闸管维持导通所必需的最小电流。

开通条件与关断条件举例1.1



开通条件与关断条件举例1.2



1.4.2 门极可关断晶闸管和集成门极换流可关断晶闸管IGCT

- 门极可关断晶闸管（ Gate-Turn-Off Thyristor — GTO ）
 - 是晶闸管的一种派生器件。在晶闸管问世后不久出现（ 1961 年 ）。
 - 可以通过在门极施加负的脉冲电流使其关断。
 - GTO的电压、电流容量较大，与普通晶闸管接近，因而在兆瓦级以上的大功率场合仍有较多的应用。
- 集成门极换流可关断晶闸管IGCT
 - 在20世纪90年代后期出现，结合了IGBT与GTO的优点，容量与GTO相当，开关速度快10倍。
 - 可省去GTO复杂的缓冲电路，但驱动功率仍很大。
 - 目前正在与IGBT等新型器件激烈竞争，试图最终取代GTO在大功率场合的位置。

1.5 电力晶体管

- 1975年电力晶体管（ Giant Transistor——**GTR**，直译为**巨型晶体管**）。
- 耐高电压、大电流的双极型功率晶体管（ Bipolar Junction Transistor——BJT ），英文有时候也称为Power BJT。

1.5.1 GTR结构和工作原理

- 由三层半导体（组成两个PN结）构成
- 一般为NPN结构，PNP结构耐压低

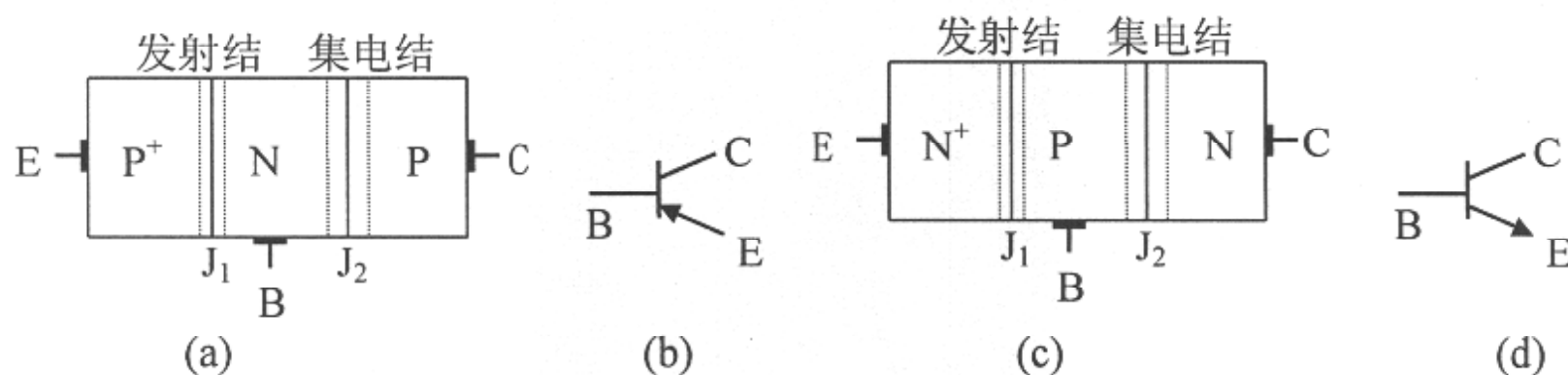
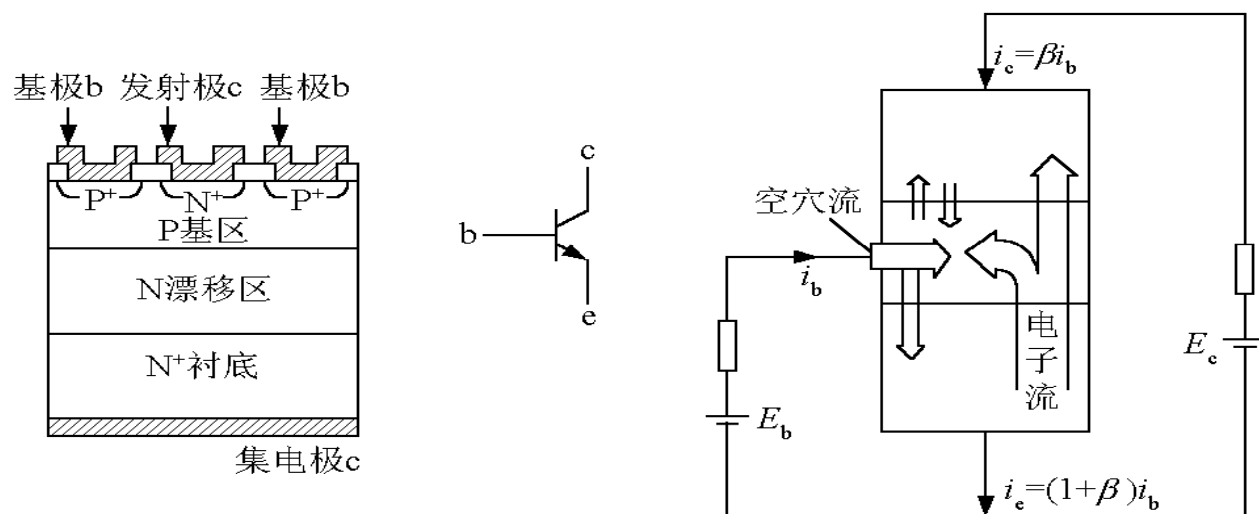


图 1—8: 晶体管的结构及电路图中的符号

(a) PNP 结构; (b) PNP 符号; (c) NPN 结构; (d) NPN 符号

- 与普通的双极型晶体管基本原理是一样的。在应用中，GTR一般采用**共发射极接法**。
- 主要特性是耐压高、电流大、开关特性好。
- 通常采用至少由两个晶体管按达林顿接法组成的单元结构，可有效增大电流增益。

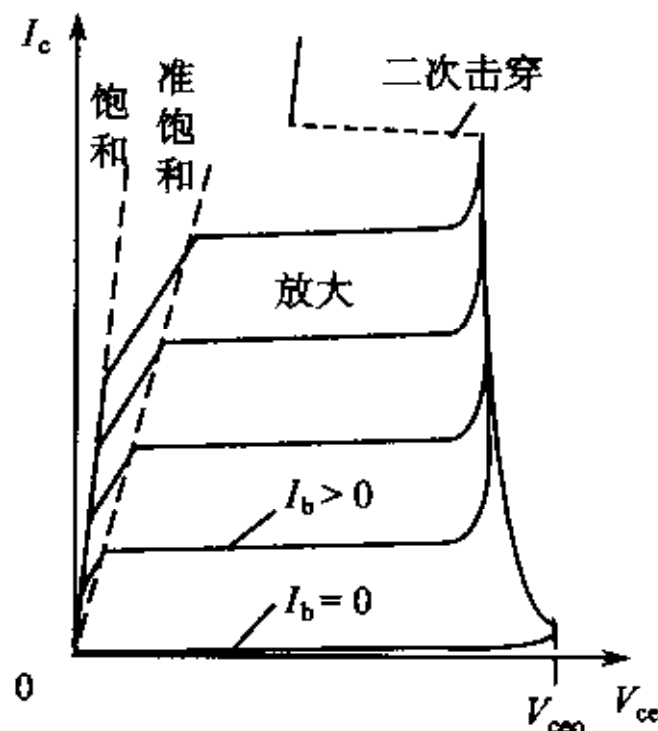


GTR的结构、电气图形符号和内部载流子的流动

a) 内部结构断面示意图 b) 电气图形符号 c) 内部载流子的流动

1.5.2 GTR的静态特性

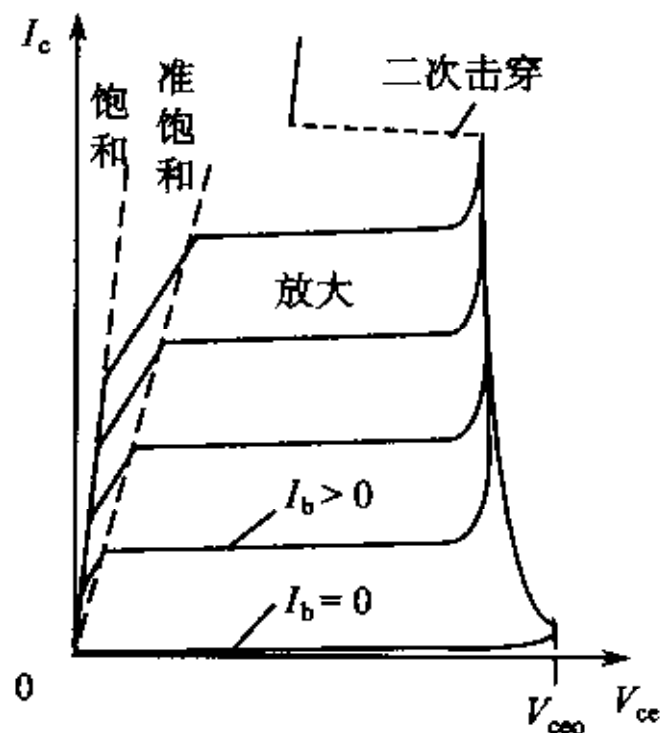
- 共发射极接法时的典型输出特性：**截止区、放大区和饱和区**。
- 在电力电子电路中GTR工作在开关状态：**断态、通态**。
- 在开关过程中，即在截止区和饱和区之间过渡时，要经过放大区。



共发射极接法时GTR的输出特性

1、截止区 发射结反偏，集电结反偏

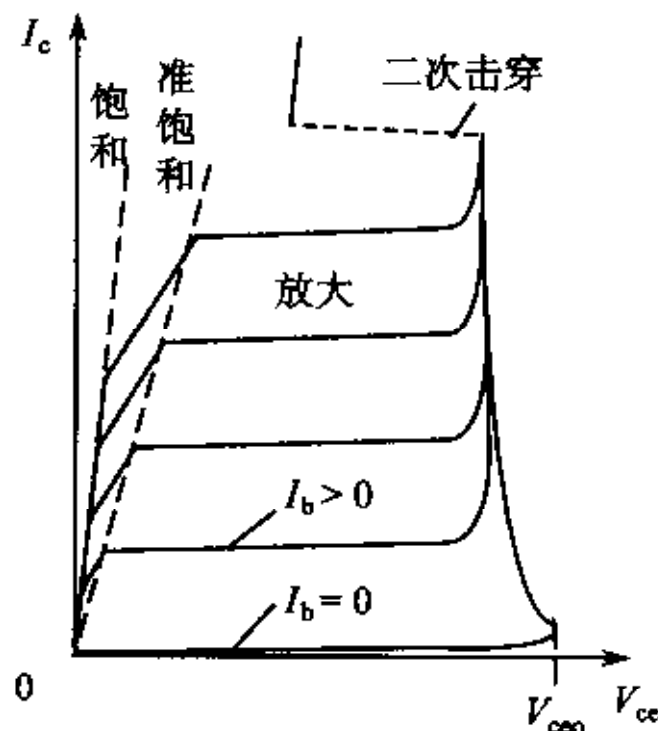
- 又称阻断区
- $i_B = 0$
- 开关处于断态
- GTR承受高电压而仅有极小的漏电流存在
- 集电结反偏 $U_{BC} < 0$ ，发射结反偏 $U_{BE} < 0$ ；或集电结反偏 $U_{BC} < 0$ ，发射结偏压为零 $U_{BE} = 0$



2、放大区

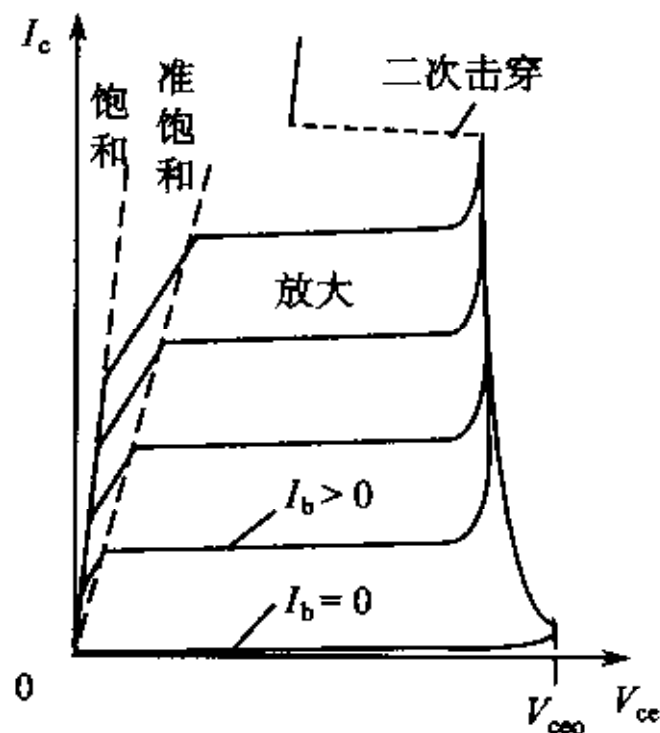
发射结正偏，集电结反偏

- 又称有源区或线性区
- i_C 与 i_B 之间呈线性关系，特性曲线近似平直
- $U_{BC} < 0$, $U_{BE} > 0$
- 对于工作于开关状态的GTR来说，应当尽量避免工作于放大区，否则功耗很大，要快速通过放大区，实现截止与饱和之间的状态转换。



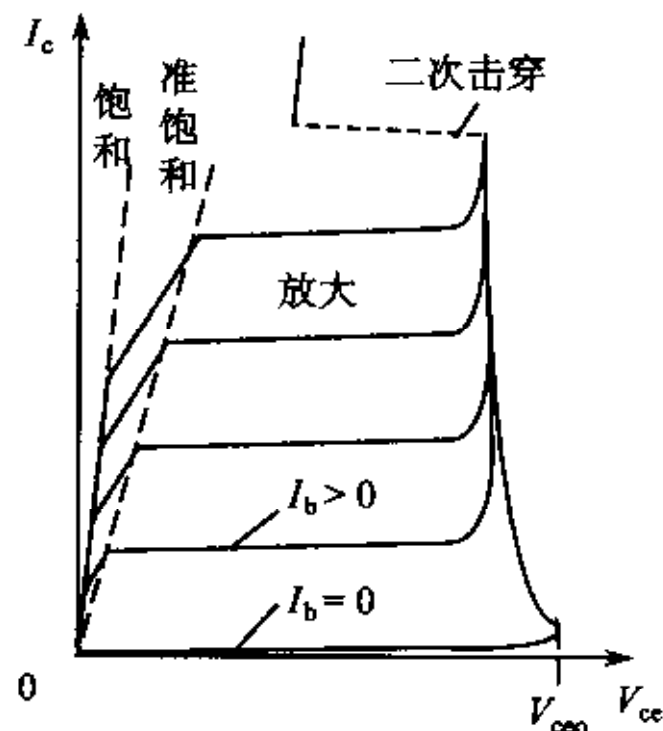
3、饱和区 发射结正偏，集电结正偏

- 开关处于通态
- i_B 变化时， i_C 不再随之变化
- 导通电压和电流增益均很小
- $U_{BC} > 0$ ， $U_{BE} > 0$



4、准饱和区

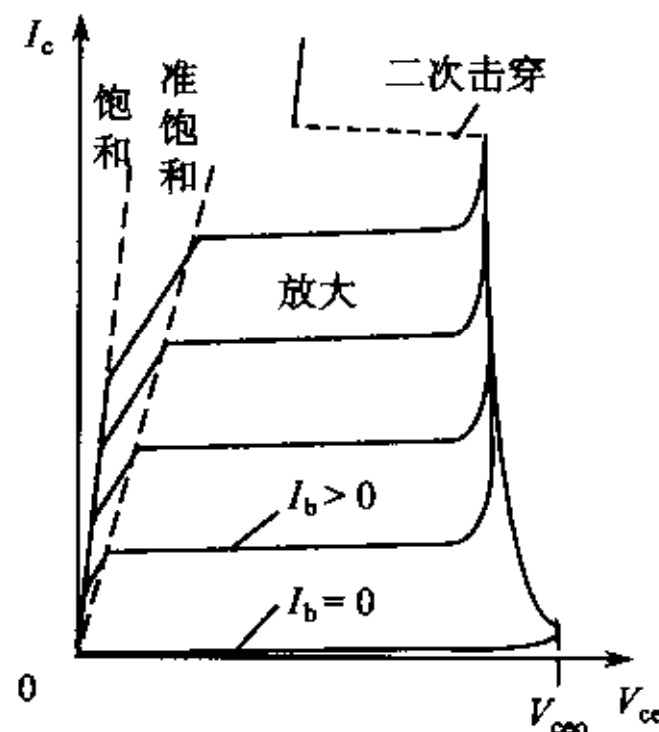
- 指放大区与饱和区之间的一段区域，即特性曲线明显弯曲的部分
- 随 i_B 增加，开始出现基区宽度调制效应，电流增益开始下降
- i_C 与 i_B 之间不再呈线性关系
- $U_{BC} < 0$ ， $U_{BE} > 0$



5、失控区

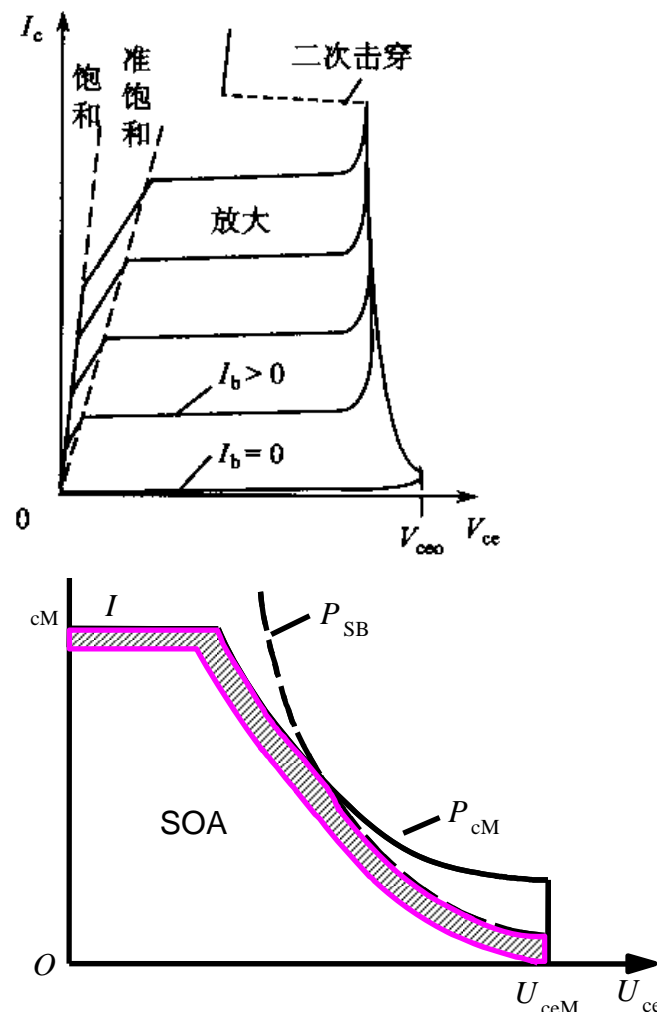
- 当 U_{CE} 超过一定值时， i_C 会急剧上升，出现非线性，晶体管进入失控区， U_{CE} 再进一步增加，会导致雪崩击穿。
- GTR上电压超过规定值时会发生击穿。击穿电压不仅和晶体管本身特性有关，还与外电路接法有关。

$U_{Bceo} < U_{Bcer} < U_{Bcex} < U_{Bcbo}$ 为不同的基极、射极连接条件下的击穿电压。实际使用时，最高工作电压要比 U_{Bceo} 低得多。



1.5.3 GTR的二次击穿现象与安全工作区

- **一次击穿**：集电极电压升高至击穿电压时， I_c 迅速增大。
 - 只要 I_c 不超过限度，GTR一般不会损坏，工作特性也不变。
- **二次击穿**：二次击穿发生时， I_c 突然急剧上升，电压陡然下降。
 - 常常立即导致器件的永久损坏，或者工作特性明显衰变。
- **安全工作区**：
 - 最高电压 U_{ceM} 、集电极最大电流 I_{cM} 、最大耗散功率 P_{cM} 、二次击穿临界线限定。



GTR的安全工作区

1.5.4 GTR特点和应用

■ 特点

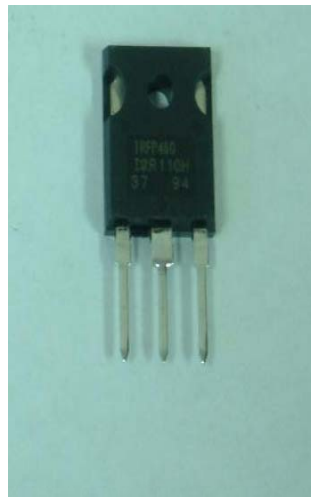
- 电流驱动型
- 所需驱动功率大
- 通态饱和电压低

■ 应用

- 20世纪80年代以来，在中、小功率范围内取代晶闸管，但目前又大多被IGBT和电力MOSFET取代。

1.6 功率场效应晶体管

- 功率金属-氧化物-硅场效应晶体管 (power metal oxide semiconductor field effect transistor)
- 简称功率MOSFET (Power MOSFET)



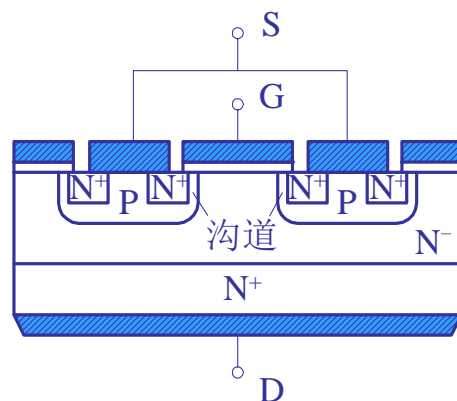
1.6. 1 功率MOSFET的结构和工作原理

■ 电力MOSFET的种类

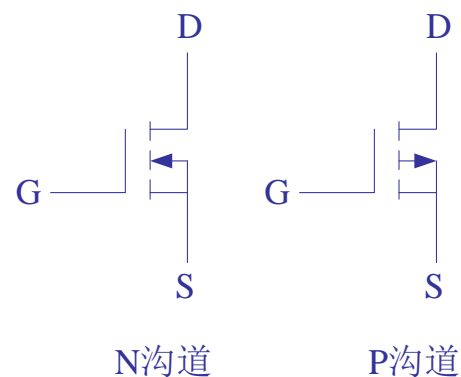
- 按导电沟道可分为P沟道和N沟道。
- 耗尽型——当栅极电压为零时漏源极之间就存在导电沟道。
- 增强型——对于N（P）沟道器件，栅极电压大于（小于）零时才存在导电沟道。
- 功率MOSFET主要是N沟道增强型。

1、功率MOSFET的结构

- 是单极型晶体管。
- 导电机理与小功率MOS管相同，但结构上有较大区别。
- 采用多元集成结构，不同的生产厂家采用了不同设计。



a)

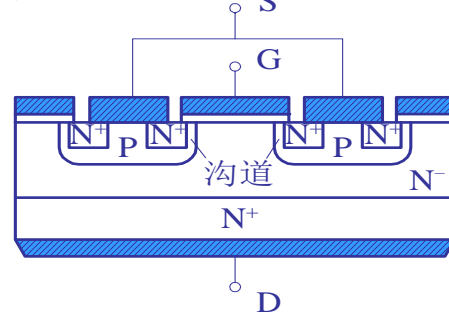


b)

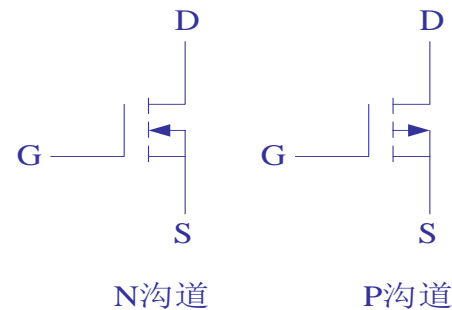
电力MOSFET的结构和电气图形符号

2、功率MOSFET的工作原理

- **截止：**漏源极间加正电源，栅源极间电压为零。
 - P基区与N漂移区之间形成的PN结 J_1 反偏，漏源极之间无电流流过。
- **导电：**在栅源极间加正电压 U_{GS}
 - 当 U_{GS} 大于 U_T 时，P型半导体反型成N型而成为反型层，该反型层形成N沟道而使PN结 J_1 消失，漏极和源极导电。



a)

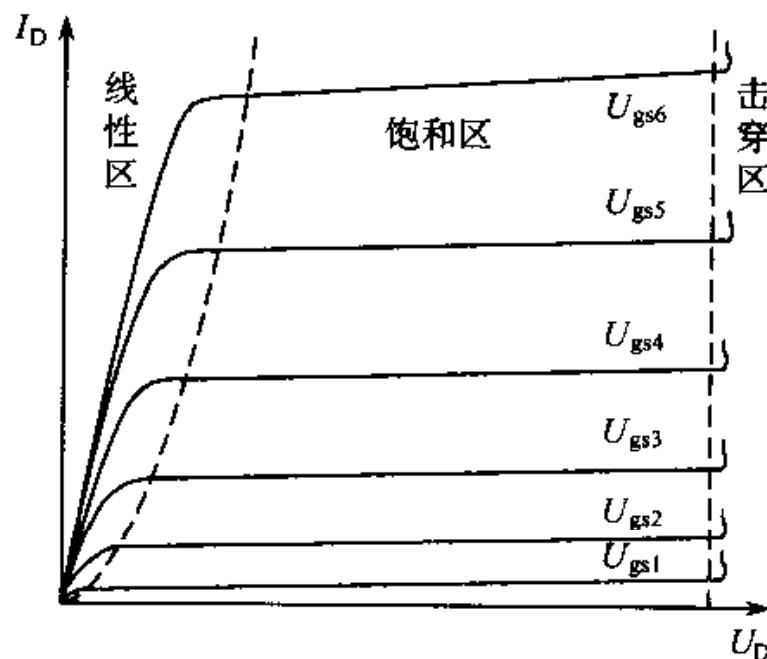


b)

电力MOSFET的结构和电气图形符号

1.6.2 功率MOSFET的静态特性

- **截止区**（对应于GTR的截止区）
 - $u_{GS} < U_T$ 时，截止
 - 阈值电压 U_T 典型值2 ~ 4V
- **饱和区**（对应于GTR的放大区）
- **线性区**（对应GTR的饱和区）
 - 输出电流 i_D 随电压 u_{DS} 线性改变。
 - u_{GS} 足够大，以保证器件导通进入线性工作区
- **工作在开关状态**，即在截止区和线性区之间来回转换。



功率MOSFET的输出特性

1.6.3 特点和应用

- **电压型驱动：用栅极电压来控制漏极电流。**
- **驱动功率小，驱动电路简单。**
- **开关速度快，工作频率高。**
 - **开关时间在10~100ns之间，工作频率可达100kHz以上，是主要电力电子器件中最高的。**
- **导通时呈阻性**
- **热稳定性优于GTR。**
- **电流容量小，耐压低，一般只适用于功率不超过10kW的电力电子装置。**

1.7 绝缘栅双极晶体管（IGBT）

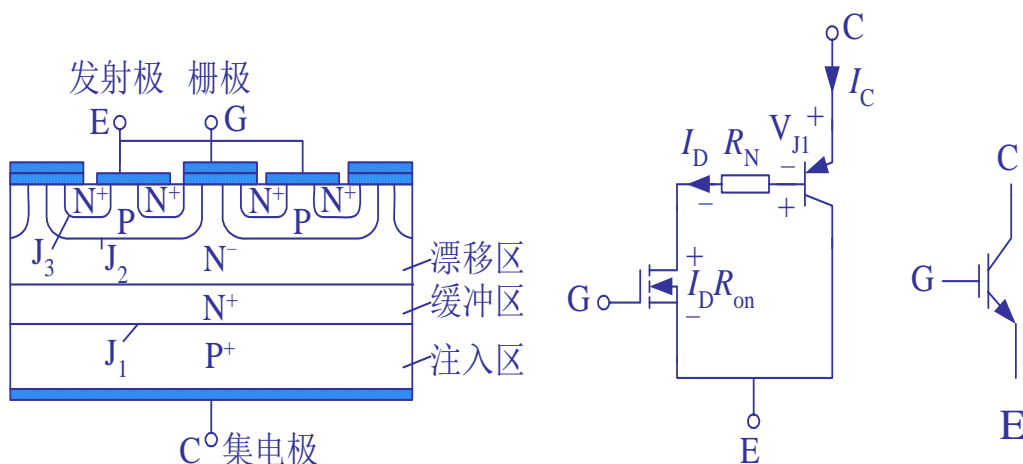
- **GTR和GTO的特点：**
 - 双极型，电流驱动，有电导调制效应，通流能力很强
 - 开关速度较低，所需驱动功率大，驱动电路复杂。
- **MOSFET的特点：**
 - 单极型，电压驱动，没有少数载流子的电导调制作用，通流能力较小
 - 开关速度快，输入阻抗高，热稳定性好，所需驱动功率小而且驱动电路简单。

1.7.1 IGBT的结构和工作原理

- **两类器件取长补短结合而成的复合器件—Bi-MOS器件。**
 - **双极器件的作用：输运主电流**
 - **MOS器件的作用：作控制开关**
- **绝缘栅双极晶体管（ Insulated-gate Bipolar Transistor——IGBT ） GTR和MOSFET复合，结合二者的优点。**
 - **1986年投入市场，是中小功率电力电子设备的主导器件。**
 - **继续提高电压和电流容量，以期再取代GTO的地位。**

1、 IGBT的结构

- 三端器件：栅极G、集电极C和发射极E
- N沟道VDMOSFET与GTR组合——N沟道IGBT。
- IGBT比VDMOSFET多一层P+注入区，具有很强的通流能力。
- 简化等效电路表明，IGBT是GTR与MOSFET组成的达林顿结构——一个有MOSFET驱动的厚基区PNP晶体管。
- R_N 为晶体管基区内的调制电阻。



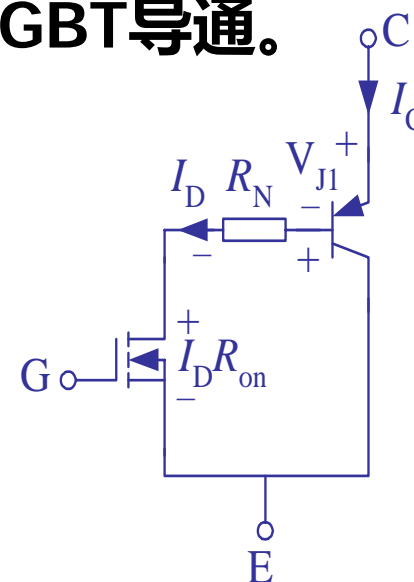
IGBT的结构、简化等效电路和电气图形符号



IGBT单管和模块

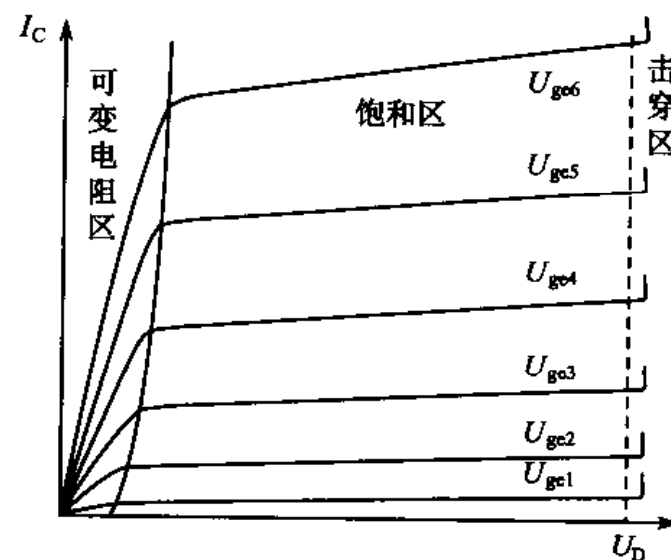
2、IGBT的原理

- 驱动原理与电力MOSFET基本相同，场控器件，通断由栅射极电压 u_{GE} 决定。
 - 导通： u_{GE} 大于开启电压 $U_{GE(th)}$ 时，MOSFET内形成沟道，为晶体管提供基极电流，IGBT导通。
 - 通态压降：电导调制效应使电阻 R_N 减小，使通态压降减小。
 - 关断：栅射极间施加反压或不加信号时，MOSFET内的沟道消失，晶体管的基极电流被切断，IGBT关断。



1.7.2 IGBT的静态特性

- 分为三个区域
 - 截止区
 - 可变电阻区
 - 饱和区



IGBT的输出特性

1.7.3 IGBT的应用特点

- **开关速度高，开关损耗小。在电压1000V以上时，开关损耗只有GTR的1/10，与电力MOSFET相当**
- **相同电压和电流定额时，安全工作区比GTR大，且具有耐脉冲电流冲击能力。**
- **通态压降比VDMOSFET低。**
- **输入阻抗高，输入特性与MOSFET类似。**
- **与MOSFET和GTR相比，耐压和通流能力还可以进一步提高，同时保持开关频率高的特点。**

当前的格局

- IGBT为主体，第四代产品，制造水平2.5kV / 1.8kA，兆瓦以下首选。仍在不断发展，与IGCT等新器件激烈竞争，试图在兆瓦以上取代GTO。
- GTO：兆瓦以上首选，制造水平6kV / 6kA。
- 电力MOSFET：长足进步，中小功率领域特别是低压，地位牢固。
- 功率模块和功率集成电路是现在电力电子发展的一个共同趋势。
 - 20世纪80年代中后期开始，模块化趋势，将多个器件封装在一个模块中，称为功率模块。
 - 将器件与逻辑、控制、保护、传感、检测、自诊断等信息电子电路制作在同一芯片上，称为功率集成电路

- **答疑**

- **双周星期二下午在电气716答疑。**

- **作业**

- **P70 : 1-1 ; 1-2 ; 1-5**
- **比较SCR、GTO、GTR、IGBT、MOSFET 的特点和应用场合**